

24. 3. 2004

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2004年 3月16日
Date of Application:

出願番号 特願2004-074288
Application Number:
[ST. 10/C]: [JP2004-074288]

出願人 松下電器産業株式会社
Applicant(s):

REC'D 21 MAY 2004

WIPO

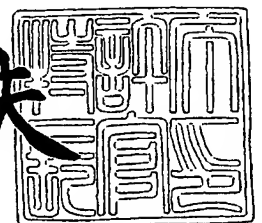
PCT

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 4月28日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願
【整理番号】 7047950029
【提出日】 平成16年 3月16日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 B06B 1/02
B06B 1/10
B81B 3/00
B82B 1/00
B82B 3/00

【発明者】
【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内
【氏名】 中村 邦彦

【特許出願人】
【識別番号】 000005821
【氏名又は名称】 松下電器産業株式会社

【代理人】
【識別番号】 100097445
【弁理士】
【氏名又は名称】 岩橋 文雄

【選任した代理人】
【識別番号】 100103355
【弁理士】
【氏名又は名称】 坂口 智康

【選任した代理人】
【識別番号】 100109667
【弁理士】
【氏名又は名称】 内藤 浩樹

【先の出願に基づく優先権主張】
【出願番号】 特願2003- 82430
【出願日】 平成15年 3月25日

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 011305
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9809938

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

機械的共振振動を行う振動体と、
前記振動体が共振振動時に近接し、かつ前記共振振動の振幅方向に湾曲して配置された電極と、
を有する機械共振器。

【請求項 2】

前記湾曲した電極の表面形状と、前記振動体が共振モードで変形したときの形状とが同一であることを特徴とする請求項 1 に記載の機械共振器。

【請求項 3】

前記振動体と対向する前記電極の表面積は前記振動体の表面積よりも小さいことを特徴とする請求項 1 あるいは 2 に記載の機械共振器。

【請求項 4】

共振時に振幅が最大になる前記振動体の部分およびその近傍と対向する位置には前記電極を配しないことを特徴とする請求項 3 に記載の機械共振器。

【請求項 5】

前記振動体の端部に対向する位置には前記電極を配しないことを特徴とする請求項 3 に記載の機械共振器。

【請求項 6】

機械的共振振動を行う振動体と、
前記振動体と近接し、同じ共振周波数の共振モードで振動する電極と、
を有する機械共振器。

【請求項 7】

前記振動体と前記電極とに接続され、それらの間に静電界を発生する
バイアス電源をさらに有し、
前記振動体と前記電極との間に共振周波数の電圧変化を受けたときに、前記振動体が共振振動する請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の機械共振器。

【請求項 8】

前記電極と前記振動体との間の電圧変化から信号を検出する検出部をさらに有し、
前記振動体が振動したときの前記振動体と前記電極との間の静電容量変化により、前記検出部が振動から電気信号に変換された信号を検出することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の機械共振器。

【請求項 9】

前記電極と前記振動体の対向面の少なくとも一方に絶縁層を設けたことを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれかに記載の機械共振器。

【請求項 10】

前記絶縁層は、絶縁性及び潤滑性を有する高分子粒子であることを特徴とする請求項 9 に記載の機械共振器。

【請求項 11】

前記電極と対向する前記振動体の表面に前記振動体から絶縁して配置された第 1 接点電極と、
前記第 1 接点電極と嵌合するように前記電極から絶縁して配置された第 2 電極と、
をさらに有することを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の機械共振器。

【請求項 12】

前記振動体と前記電極とに接続され、それらの間に静電界を発生するバイアス電源をさらに有し、
前記振動体と前記電極との間に電圧変化を受けたとき、前記振動体が共振振動し、前記第 1 接点電極が前記第 2 接点電極に接近した時点で前記バイアス電源の電圧により静電吸着することを特徴とする請求項 11 に記載の機械共振器。

【請求項 13】

請求項 7 あるいは 8 に記載の機械共振器を、複数個、電氣的に並列に配置したことを特徴とする機械共振器。

【請求項 1 4】

請求項 7 あるいは 8 に記載の機械共振器を、複数個、電氣的に直列に配置したことを特徴とする機械共振器。

【請求項 1 5】

請求項 1 乃至 1 4 のいずれかに記載の機械共振器を、雰囲気を真空中に封止したケース内に収納したことを特徴とする機械共振器。

【請求項 1 6】

請求項 1 乃至 1 0 のいずれかに記載の機械共振器を用いたことを特徴とするフィルタ。

【請求項 1 7】

請求項 1 1 あるいは 1 2 に記載の機械共振器を用いたことを特徴とするスイッチ。

【請求項 1 8】

請求項 1 乃至 1 5 のいずれかに記載の機械共振器を用いた電気回路。

【書類名】明細書

【発明の名称】機械共振器

【技術分野】

【0001】

本発明は機械式の共振器に関し、特に高密度に集積化された電気回路内において、小型で高性能のフィルタ回路やスイッチ回路を実現するものに関する。

【背景技術】

【0002】

従来の機械共振器について図22を参照して説明する。図22は非特許文献1に紹介されている機械振動フィルタの構成を簡略化して示した図である。

【0003】

このフィルタは、シリコン基板上に薄膜形成を行うことで形成されている。入力線路104と、出力線路105と、それぞれの線路に対して1ミクロン以下の空隙をもって配置された両持ち梁101、102と、その2つの梁を結合する結合梁103とで構成されている。入力線路104から入力した信号は、梁101と容量的に結合し、梁101に静電力を発生させる。信号の周波数が、梁101、102および結合梁103からなる弾性構造体の共振周波数近傍と一致したときのみ機械振動が励振されるので、この機械振動をさらに出力線路105と梁102との間の静電容量の変化として検出することで、入力信号のフィルタリング出力を取り出すことができる。

【0004】

矩形断面の両持ち梁の場合、弾性率E、密度 ρ 、厚みh、長さLとすると、共振周波数fは、次式となる。

【0005】

【数1】

$$f = 1.03 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

【0006】

材料をポリシリコンとすると $E = 160 \text{ GPa}$ 、 $\rho = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、また寸法を $L = 40 \mu\text{m}$ 、 $h = 1.5 \mu\text{m}$ とすると $f = 8.2 \text{ MHz}$ となり、約8MHz帯のフィルタを構成することが可能である。コンデンサやコイルなどの受動回路で構成したフィルタに比べて機械共振を用いることでQ値の高い急峻な周波数選択特性を得ることができる。

【非特許文献1】 Frank D. Bannon III, John R. Clark, and Clark T.-C. Nguyen, "High-Q HF Microelectromechanical Filters," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 35, No.4, pp.512-526, April 2000

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、上記従来の構成では、さらに高周波帯のフィルタを構成するには、以下のような制約がある。すなわち、(数1)から明らかなことは、第1に材料を変更して E/ρ を大きくすることである。ただし、Eを大きくすると梁をたわませる力が同じであっても梁の変位量は小さくなってしまい、梁の変位を検知することが難しくなる。また、梁の曲がりやすさをあらわす指標を、両持ち梁の梁表面に静荷重を加えたときの梁中心部のたわみ量dと梁の長さLの比 d/L とすると、 d/L は、次式の比例関係で表される。

【0008】

【数 2】

$$\frac{d}{L} \propto \frac{L^3}{h^3} \cdot \frac{1}{E}$$

【0009】

これらから、 d/L の値を保ちながら共振周波数を上げるには、少なくとも E は変更できず、密度 ρ の低い材料を求める必要があるが、ポリシリコンと同等のヤング率で密度が低い材料としてはCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 等の複合材料を用いる必要がある。この場合、半導体プロセスで微小機械振動フィルタを構成することは難しくなる。

【0010】

このような複合材料を用いない第2の方法は、(数1)において梁の寸法を変更して $h \cdot L^{-2}$ を大きくすることである。しかし、 h を大きくすることと L を小さくすることはたわみやすさの指標である(数2)の d/L を小さくしてしまい、梁のたわみを検出することが難しくなる。

【0011】

(数1)および(数2)について $\log(L)$ と $\log(h)$ の関係を図23に示すと、直線191は(式1)から求まる関係であり、直線192は(式2)から求まる関係である。この図23において、現寸法A点を起点に傾き「2」の直線より上の範囲(領域A)の L と h を選ぶと f は大きくなり、傾き「1」の直線より下の範囲(領域B)の L と h を選ぶと d/L は大きくなる。従って、図中のハッチング部分(領域C)が梁のたわみ量も確保しつつ共振周波数を上げることができる L と h の範囲である。

【0012】

図23より明らかなことは、機械振動フィルタの高周波化には、 L および h 双方の寸法の微小化が必要条件であり、 L および h を同じスケールで小型化すること、すなわち傾き1の直線に乗りながら L と h を小さくすることは、図19のハッチング部分の十分条件である。

【0013】

このように、従来の機械共振器では機械振動体の寸法を小型化することで、共振周波数は高周波化されるが、それでも梁の振動は小さくなるので振動を検出する信号が微弱になることは避けられず、外乱の影響を受けやすくなるという課題を有していた。

【0014】

本発明は、フィルタ等の回路部品の高性能化を実現する微小な機械共振器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0015】

この課題を解決するために本発明は、電極表面形状を振動体の共振モードで変形したときの形状にすることにより、共振振動を行う振動体の単位変位量あたりの容量変化を大きくし、電気信号を効率よく機械振動に変換する構造、または機械振動を効率よく電気信号に変換する構造を実現した。

【0016】

本発明の第1の態様にかかる機械共振器は、機械的共振振動を行う振動体と、この振動体が共振振動時に近接し、かつ共振振動の振幅方向に湾曲して配置された電極とを有している。これによって、共振振動を行う振動体の単位変位量あたりの容量変化を大きくし、電気信号を効率よく機械振動に変換する構造、または機械振動を効率よく電気信号に変換することができる。

【0017】

また、本発明の第2の態様にかかる機械共振器は、第1の態様の湾曲した電極の表面形

状と、振動体が共振モードで変形したときの形状とが同一であることを特徴とするものである。これにより、この振動体に対する静電容量を最大限まで増やすことができるので、共振振動を行う振動体の単位変位量あたりの容量変化を大きくし、電気信号を効率よく機械振動に変換する構造、または機械振動を効率よく電気信号に変換することができる。

【0018】

また、本発明の第3の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1あるいは第2の態様の振動体と対向する電極の表面積が、振動体の表面積よりも小さいことを特徴とするものである。これにより、振動体と電極との容量結合における過剰な電荷発生を抑制することができるので、不要な漏洩する交流電流を削減することが可能になる。特に、共振時に振幅が最大になる振動体の部分およびその近傍と対向する位置には電極を配しないようにすることにより、電圧と力、変位と電流間の関係がより線形に近づき、制御を容易にすることができる。あるいは、振動体の端部に対向する位置には電極を配しないようにすることにより、簡単な構造で過剰な電荷発生を抑制することができる。

【0019】

また、本発明の第4の態様にかかる機械共振器は、機械的共振振動を行う振動体と、振動体と近接し、同じ共振周波数の共振モードで振動する電極とを有している。これにより、振動していないときには、静電容量を平行平板構造なみに小さくし、共振周波数で振動しているときは、この振動子に対しては静電容量が最大となるので、 $|\Delta C / \Delta y|$ の値を大きくすることができる。その結果、不要な交流電流が低減され、かつ電気信号を効率よく機械振動に変換したり、機械振動を効率よく電気信号に変換できる。

【0020】

また、本発明の第5の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1乃至第4の態様の振動体と電極とに接続され、それらの間に静電界を発生するバイアス電源をさらに有し、振動体と電極との間に共振周波数の電圧変化を受けたときに、振動体が共振振動するものである。これにより、電気信号を効率よく機械振動に変換できる。

【0021】

また、本発明の第6の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1乃至第4の態様の電極と振動体との間の電圧変化から信号を検出する検出部をさらに有し、振動体が振動したときの振動体と電極との間の静電容量変化により、検出部が振動から電気信号に変換された信号を検出することを特徴としている。これにより、機械振動を効率よく電気信号に変換できる。

【0022】

また、本発明の第7の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1乃至第4の態様において、電極と振動体の対向面の少なくとも一方に絶縁層を設けたことを特徴とする。これにより、振動体と電極との電氣的短絡を回避することができる。特に、絶縁層は、絶縁性及び潤滑性を有する高分子粒子であることを特徴としている。これにより、絶縁層厚が一定になり、かつフッ素樹脂の潤滑性があるので、振動体がフッ素樹脂粒子5に接触しても static と呼ばれる制御不能な吸着力を減少させることができる。

【0023】

また、本発明の第8の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1乃至第4の態様において、電極と対向する振動体の表面に振動体から絶縁して配置された第1接点電極と、この第1接点電極と嵌合するように電極から絶縁して配置された第2電極とをさらに有している。これにより、静電力による振動体の動的な変位量が静的な変位量に比べQ値倍にもなるので、小さな電圧で接点電極を接触させることができる。

【0024】

特に、前記振動体と前記電極とに接続され、それらの間に静電界を発生するバイアス電源をさらに有し、振動体と電極との間に電圧変化を受けたとき、振動体が共振振動し、第1接点電極が第2接点電極に接近した時点でバイアス電源の電圧により静電吸着することによって特徴としている。これにより、振動体の共振振動の変位量が電極に衝突する程度にまで制御され、再接近した瞬間に前記振動体と前記電極との間の静電力の引き込みにより前記

振動体が前記電極に吸い付くことで第1接点電極と第2接点電極とが接触固定されることができ、これを利用したスイッチング機能を実現できるものである。

【0025】

また、本発明の第9の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1～第4の態様の機械共振器を、複数個、電氣的に並列または直列に配置したことを特徴とするものであり、電極が、振動体と同じ共振周波数の共振モードで振動することを特徴としてもよい。

【0026】

このように、適宜フィルタの個数を調整することにより、特に、高周波回路で問題となるインピーダンス不整合による反射信号を減少させ、効率よく電気信号を機械振動に変換し、かつ機械振動を再び電気信号として取り出すことができる。

【0027】

また、本発明の第10の態様にかかる機械共振器は、本発明の第1～第9の態様にかかる機械共振器を、雰囲気真空に封止したケース内に収納したことを特徴とするものである。これにより、空気の粘性による振動体への減衰効果を排除できるので、Q値をあげることが可能になる。

【0028】

また、本発明の第11の態様にかかるフィルタは、本発明の第1～第7の態様にかかる機械共振器を用いたことを特徴とするものである。

【0029】

また、本発明の第12の態様にかかるスイッチは、本発明の第8の態様にかかる機械共振器を用いたことを特徴とするものである。

【0030】

また、本発明の第13の態様にかかる電気回路は、本発明の第1～第12の態様にかかる機械共振器を用いたものである。

【発明の効果】

【0031】

以上のように本発明によれば、電気信号を効率よく機械振動に変換する構造、および機械振動を効率よく電気信号に変換する構造を実現できる。また、本発明の機械共振器を用いて、高密度に集積化された電気回路内において、小型で高性能のフィルタ回路やスイッチ回路を実現することも可能である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0032】

以下、本発明の実施の形態について、図1から図21を用いて説明する。

【0033】

(実施の形態1)

図1は、本発明の実施の形態1にかかる機械共振器の概要図である。

【0034】

図1において、振動体1はその両端を固定された固定端7とした両持ち梁であり、厚み h 、幅 W 、長さ L である。電極2は振動体1に近接して設けられている。両者の接触による電氣的短絡を避けるために電極2表面には厚さ d 、比誘電率 ϵ_r の絶縁層3が設けられている。このとき、両持ち梁である振動体1の横振動一次共振モードを利用すると、振動体1の共振モードでの形状は図中の $x-y$ 座標を用いて、次式で表される。

【0035】

【数3】

$$y(x) = y_{\max} \left[\frac{1}{1.6164} \{ \zeta (\cos kx - \cosh kx) + \sin kx - \sinh kx \} \right]$$

$$\zeta = -1.01781, \quad k = 4.730/L$$

【0036】

なお、その最大値 y_{max} ($x=2/L$ のとき) は振動体にかかる励振力の大きさや、振動体内部の熱損失、周辺の空気の粘性などにより決定される。

【0037】

また、電極2および絶縁層3の表面も(数3)の形状を有するなだらかな凹形状をしており、その深さ δ_{max} は振動体1の振動振幅 y_{max} よりも大きめにとっている。具体的には電極2の表面形状は、次式のように設定してある。

【0038】

【数4】

$$y(x) = -\delta_{max} \left[\frac{1}{1.64164} \{ \xi (\cos kx - \cosh kx) + \sin kx - \sinh kx \} \right] - d$$

【0039】

なお、過度の励振力等による振動体と電極との接触を想定しなければ絶縁層3を設ける必要はない。

【0040】

図2は図1の機械共振器を電気→機械変換に用いた場合であり、振動体1と電極2との間にバイアス電圧 V_b および交流信号 v_i ($v_i \ll V_b$) が印加されている。この振動体1の弾性振動を等価質量 m なるバネ質点系におきかえて考えると、この質点には、次式で表される静電力がかかる。

【0041】

【数5】

$$F = -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial y} (V_b + v_i)^2 \cong -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial y} (V_b^2 + 2V_b v_i)$$

【0042】

但し、 F は静電力であり、 C は振動体と電極間の静電容量である。また、右辺第一項はバイアス電圧 V_b によるバイアス力をあらわす。

【0043】

(数5) より交流信号電圧の励振力への変換は、振動体の単位変位量あたりの容量変化である $|\Delta C / \Delta y|$ が大きいほど効率がよい。ここで、(数4) であらわされる電極形状を用いた図2の構造では、図3のような従来の平行平板型の電極構造に比べてより大きな $|\Delta C / \Delta y|$ が得られることを次に示す。

【0044】

図2において $d = 0.1 \mu\text{m}$ 、 $\epsilon_r = 1$ 、 $\delta_{max} = 1 \mu\text{m}$ 、 $L = 40 \mu\text{m}$ 、 $W = 20 \mu\text{m}$ としたときの振動体中央部の変位量 y と静電容量 C との関係を図4に示す。なお、同じ d 、 ϵ_r 、 δ_{max} 、 L 、 W の値での図3の構造における y と C の関係も図4に併せて示した。すなわち、図4において、特性曲線401が図2の構造をした機械共振器での変化を示し、特性曲線402が図3の構造をした機械共振器での変化を示している。

【0045】

$y = 0$ 近傍では、図3の構造では $|\Delta C / \Delta y| = 3.1 \times 10^{-9} [\text{F/m}]$ であるが、図2の構造では $|\Delta C / \Delta y| = 9.8 \times 10^{-9} [\text{F/m}]$ まで改善されている。すなわち、同じ交流信号 v_i でも図2の構造をとることで、より大きな共振振動を得ることができる。なお、例えば振動体の共振振幅が $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の範囲内で振動し、それ以上の振幅は電気回路的にまたは機械的に抑制されることが保証されていれば、 δ_{max} の値はより小さく設定することができる。たとえば、 $\delta_{max} = 0.3 \mu\text{m}$ とすると、 y と C の特性は図5に示す特性曲線501、および特性曲線502のようになり、図2の構造で $|\Delta$

$C/\Delta y = 4.7 \times 10^{-8} [F/m]$ までさらに改善された。

【0046】

なお、図4において y と C との関係が線形とみなせる領域では $\Delta C/\Delta y$ は一定値となり、(数5)から、交流電圧と励振力との関係は線形として取り扱うことができる。

【0047】

次に、図1に示した本実施の形態にかかる機械共振器の製作工程を図18(a)乃至(d)に示す。

【0048】

振動体および電極は基板10上に形成される。例えば基板10は表面に熱酸化によるシリコン酸化膜および減圧CVD法によるシリコン窒化膜が堆積された高抵抗シリコン基板である。

【0049】

はじめに、基板10にフォトリソグرافィからなる犠牲層をスピンコート、露光、現像したのち、ホットプレートでベークを行い、犠牲層11を形成する(図18(a))。

【0050】

次に、基板全面にアルミニウム12をスパッタにより堆積する(図18(b))。

【0051】

次に、アルミニウム上にフォトリソグرافィを形成し、フォトリソグرافィによりパターンニングを行い、前記フォトリソグرافィからなるパターンをマスクとしてアルミニウムのドライエッチングを行うことで、振動体13および電極14を形成する(図18(c))。このとき、電極14が振動体13に対向する面の形状は(数4)で表現される曲線とする。これはフォトリソグرافィに用いるマスク上のパターンを(数4)で表現される曲線とすることで実現される。

【0052】

さらに、酸素プラズマによりフォトリソグرافィからなるパターンならびに犠牲層11を除去する。これにより振動体13は振動が可能な両持ち梁となり、また電極14との間でコンデンサを形成する(図18(d))。振動体13の振動は振動体13と電極14の間の静電力により発生させることができる。この場合、振動体13の振動方向は基板に対して水平方向となる。

【0053】

なお、本実施の形態では高抵抗シリコン基板を用いたが、通常のシリコン基板、化合物半導体基板、絶縁材料基板を用いても良い。

【0054】

また、高抵抗シリコン基板10上に絶縁膜としてシリコン酸化膜およびシリコン窒化膜を形成したが、基板の抵抗が十分高い場合これら絶縁性膜の形成を省略しても良い。

【0055】

また、本実施の形態では振動体および電極を形成する材料としてアルミニウムを用いたが、他の金属材料Mo、Ti、Au、Cu、ならびに高濃度に不純物導入された半導体材料例えばアモルファスシリコン、導電性を有する高分子材料などを用いても良い。さらに、成膜方法としてスパッタを用いたがCVD法、メッキ法などを用いて形成しても良い。

【0056】

なお、本実施の形態における振動体は両持ち梁としたが、片持ち梁についても電極の表面形状を片持ち梁のモード形状と同じにすることにより、同様に $|\Delta C/\Delta y|$ を大きくする効果を得ることができる。

【0057】

次に、振動体を片持ち梁とした場合の機械共振器について説明する。

【0058】

図19は振動体を片持ち梁とした場合の機械共振器の概要図である。振動体21は片方の単面を固定された片持ち梁であり、厚み h 、幅 W 、長さ L である。電極22は振動体21に近接して設けられており、表面に厚さ d の絶縁層23が設けられている。片持ち梁を

1 次の共振モードで励振する場合、電極 22 の表面形状は次式のように設定する。

【0059】

【数6】

$$i = \frac{dq}{dt} \cong \frac{dC}{dy} \frac{dy}{dt} V$$

【0060】

なお、本発明の実施の形態における両持ち梁または片持ち梁の振動モードは横振動の 1 次モードとしたが、2 次以上の高次のモードに対しても電極の表面形状を振動体の共振モード波形とすることで $|\Delta C / \Delta y|$ を大きくする効果を得ることができる。

【0061】

図 20 (a) の x y 平面上に描かれた実線の曲線は、片持ち梁の横振動 2 次モード波形をあらわしている。すなわち、長さ L の片持ち梁は固定端から $0.774L$ の箇所に 1 つの節を持つ。このとき、長さ L の全長にわたって電極の表面形状を共振モードでの波形とすると、節から自由端部の梁の共振が電極により阻害されてしまうので、図 20 (b) に示すように電極を固定端から節までの長さにとどめている。

【0062】

また、この他に図 20 (c) のように電極を節から自由端までの長さの位置に配しても同様の効果が得られる。あるいは、図 20 (d) のように、図 20 (b) や、図 20 (c) の電極 22 をそれぞれ振動体をはさんで配置し、例えば、電極 22 a は振動体 21 の励振用に、電極 22 b は振動体 21 の振動の検出用に用いることもできる。

【0063】

以上のように本実施の形態によれば、電極表面形状を振動体の共振モードでの形状とすることで、共振振動を行う振動体の単位変位量あたりの容量変化が最大になるので、電気信号を効率よく機械振動に変換したり、機械振動を効率よく電気信号に変換したりすることができる。なお、電極表面形状は振動体の共振モードの形状と完全に一致することは必須ではなく、その形状に近いほど効果が高く得られる。

【0064】

また、上記したように片持ち梁に励振用と検出用の電極を取り付けることにより、変換効率の優れた、小型化した機械振動フィルタを実現できる。

【0065】

(実施の形態 2)

図 6 は図 1 の構造の機械共振器を機械→電気変換器に利用した例である。

【0066】

図 6 において、y 軸方向に横振動を行う振動体 1 の変位は電極 2 との間の容量 C の変化として検出される。流れる電流 i は、次式のようになり、振動速度と $\Delta C / \Delta y$ の積であらわされる。

【0067】

【数7】

$$y(x) = -\delta_{\max} \left[\frac{1}{2} \{ \cosh kx - \cos kx - 0.734096 (\sinh kx - \sin kx) \} \right] - d$$

$$k = \frac{1.875104}{L}$$

【0068】

$\Delta C / \Delta y$ がほぼ一定値とみなせる変位領域を用いると、梁の変位信号は電流信号を積分器 601 に通すことで再生され、このとき $|\Delta C / \Delta y|$ が大きいほど大きな電流信号

が得られる。図2と同様に $d = 0.1 \mu\text{m}$ 、 $\epsilon_r = 1$ 、 $\delta_{\text{max}} = 1 \mu\text{m}$ 、 $L = 40 \mu\text{m}$ 、 $W = 20 \mu\text{m}$ とすると、図4ですでに示したとおり本発明の構造を採用した方が図3に示した従来の平行平板構造よりも大きな $|\Delta C / \Delta y|$ が得られる。これより、本実施の形態の機械→電気変換器は微弱な振動を効率よく電気信号に変換することができる。

【0069】

(実施の形態3)

図7は本実施の形態に係る機械共振器を用いた機械振動フィルタの構造図である。

【0070】

図7において、機械振動フィルタは図22に示したフィルタ構造の電気→機械変換部である入力線路104と両持ち梁101との容量結合部分、および機械→電気変換部である出力線路105と両持ち梁102との容量結合部分の双方に、本発明の実施の形態1および2として図1に示した共振モードでの形状を有する電極を適用している。さらに、この機械振動フィルタは一組の電気→機械変換部および機械→電気変換部からなるフィルタを、複数個並列に配置し、入力電圧を分岐して各フィルタに入力し、かつ、各フィルタの出力電流信号をまとめて取り出した構造をしている。このように適宜フィルタの個数を調整することにより、特に高周波回路で問題となるインピーダンス不整合による反射信号を減少させ、効率よく電気信号を機械振動に変換し、かつ機械振動を再び電気信号として取り出すことができる。

【0071】

次に複数のフィルタを直列に配した例を示す。

【0072】

図8は梁構造の上面図であり、梁側面a1、a2、b1、b2、c1、c2部の6箇所が固定面として固定された構造である。この構成により長さL、幅Wの2つの両持ち梁を直列に構成したこととほぼ等価となる。これはどちらか一方の両持ち梁の振動が固定面b1、b2の間を介して他方の両持ち梁に伝わるからであり、この固定面b1、b2の間が結合梁の役割を果たしている。

【0073】

図9は上記の梁構造の機械共振器を用いた機械振動フィルタの構造図である。

【0074】

図9において、図8に示した梁構造の一方の両持ち梁101と、図1に示した本発明の電極構造を有する入力線路104とは容量結合し、もう一方の両持ち梁102と図1の電極構造を有する出力線路105とは容量結合している。また、さらにこの梁構造をした機械振動フィルタはフィルタを複数個直列に配した構造となる。このように、図8の梁構造をとることで容易に直列接続によるインピーダンス整合をとることができる。またさらに、図18の結合梁103のような極細の衝撃に弱い構造体を設ける必要がないので、強度も高まり、製作にかかる歩留まりも改善される。

【0075】

(実施の形態4)

図10は、電気→機械変換器と機械→電気変換器とを個別に有する図18のフィルタ構造とは異なり、1つの振動体で両方の機能を実現させる機械共振器構造を有する機械振動フィルタである。具体的には、本実施の形態は実施の形態1の図2に示した電気→機械変換器と、実施の形態2の図6に示した機械→電気変換器との双方に共通する構造を共有している。この構造は構成が簡易であることを特長とするが、入力信号 v_i により励振された振動体1の変位に伴う容量変化に起因して発生する交流電流以外にも、定常的なコンデンサ容量を介して漏洩する不要交流電流が発生する。すなわち、図4において交流動作点を例えば $y = 0$ とした場合、 $y = 0$ における容量が大きいと、励振に起因しない不要交流電流も流れてしまい、フィルタの機能は低下する。従って、 $|\Delta C / \Delta y|$ は大きいことが望ましいことは実施の形態1、2で述べてきた通りであるが、可能な限りCの値は低減する必要がある。

【0076】

そこで本実施の形態では図 11 (a) に示すように、機械共振器は振動体 1 に対向する電極 2 も振動体 1 と同じ共振周波数の共振モードで振動する構造体とし、モード定在波波長の $1/2$ だけ相対位置をずらして配している。ここでは一次共振モードを使うので梁の長さ L の $1/2$ だけ電極 2 を x 方向にずらしている。

【0077】

この機械共振器は実施の形態 3 に示した並列構造をした機械振動フィルタであり、図 11 (a) には x 方向への繰り返し構造の一部分のみが図示されている。また、振動体 1 と電極 2 の振動の状態を図 11 (b) に示す。ここで、図 4 の 403 に振動変位 y と長さ L あたりのコンデンサ容量 C との関係を示す。図 11 (a) の状態、すなわち振動変位 $y = 0$ のときには、容量 C は図 3 の平行平板構造と同じ程度に小さな値をとることができる。また、共振状態を示す図 11 (b) では容量はきわめて近接する導電体間の容量、すなわち本発明の実施の形態 1 および実施の形態 2 で述べた図 2、および図 6 の構造における容量まで近づく。その結果、 $y = 0$ において $|\Delta C / \Delta y| = 6.3 \times 10^{-9} [\text{F/m}]$ となり、図 3 に示した従来の平行平板構造の値よりも大きく、図 2 や、図 6 の構造の値に近づく。従って、図 11 の構造を図 10 の機械振動フィルタに適用することで不要な交流電流が低減され、かつ $|\Delta C / \Delta y|$ の値の大きい高効率のフィルタを構成することができる。

【0078】

図 5 の 503 は $\delta \max = 0.3 \mu\text{m}$ とした場合の $y-C$ 特性である。図 5 において、 $y = 0$ のときの図 11 の構造を有する機械共振器の静電容量 C は図 3 に示した従来の平行平板構造なみに小さく、一方で、 $|\Delta C / \Delta y|$ は図 2、図 6 の構造と同等にまで大きくすることができることが示されている。

【0079】

これらにより、本実施の形態に係る機械共振器は、簡単な構成で、振動体の変位が小さいときの静電容量を小さくし、振動体が共振モードで変位が大きいときの静電容量を大きくすることができる。そのため、不要な交流電流が低減され、かつ電気信号を効率よく機械振動に変換したり、機械振動を効率よく電気信号に変換したりすることができる。また、この機械共振器を用いた機械振動フィルタは、両持ち梁に励振用と検出用の電極を取り付けることにより、変換効率の優れた、小型化した機械振動フィルタを実現できる。

【0080】

図 21 (a) 乃至 (d) は、図 11 に示した、本実施の形態に係る機械共振器の製作工程を示す図である。

【0081】

図 21 (a) 乃至 (d) において、振動体は基板 10 上に形成される。例えば基板 10 は表面に熱酸化によるシリコン酸化膜、および減圧 CVD 法によるシリコン窒化膜が堆積された高抵抗シリコン基板である。

【0082】

初めに、基板 10 にフォトレジストからなる層をスピコート、露光、現像したのち、ホットプレートでベークを行い、犠牲層 11 を形成する (図 21 (a))。このとき、犠牲層 11 には一定ピッチでならんだ微細穴 15 a、および 15 b を形成する。微細穴 15 a、15 b は図示したように互いに $1/2$ ピッチずれた位置に形成する。

【0083】

次に、基板全面にアルミニウム 12 をスパッタにより堆積する (図 21 (b))。このとき、微細穴 15 にもアルミニウム 12 が埋め込まれる。

【0084】

次に、アルミニウム上にフォトレジストを形成し、フォトリソグラフィによりパターンニングを行う。そして、前記フォトレジストからなるパターンをマスクとして、アルミニウムのドライエッチングを行うことにより、振動体 13 a および振動体 13 b を形成する (図 21 (c))。このとき、振動体 13 a は微細穴 15 a 上に、振動体 13 b は微細穴 15 b 上に形成する。

【0085】

さらに、酸素プラズマにより、フォトリソグラフィからなるパターンならびに犠牲層11を除去する。これにより、振動体13は振動が可能な梁となる。また、振動体13は微細穴15に埋め込まれたアルミニウムによるアンカー16により基板10上に固定されるので、アンカー16を固定端とした両持ち梁が連続して構成されることになる。これにより、図11の機械共振器構造を実現することができる。ただし、この場合、振動体13の振動方向は基板に対して水平方向となる。

【0086】

なお、本実施の形態では高抵抗シリコン基板を用いたが、通常のシリコン基板や、化合物半導体基板や、絶縁材料基板を用いても良い。

また、高抵抗シリコン基板10上に絶縁膜としてシリコン酸化膜およびシリコン窒化膜を形成したが、基板の抵抗が十分高い場合、これら絶縁性膜の形成を省略しても良い。

【0087】

なお、本実施の形態では、梁を形成する材料としてアルミニウムを用いたが、他の金属材料Mo、Ti、Au、Cu、ならびに高濃度に不純物導入された半導体材料、例えばアモルファスシリコン、導電性を有する高分子材料などを用いても良い。さらに成膜方法としてスパッタを用いたが、CVD法、メッキ法などを用いて形成しても良い。

【0088】

(実施の形態5)

本実施の形態は、実施の形態4と同じ目的で、不要に発生する交流電流を抑制するために機械共振器のコンデンサ容量の低減を図る方法に関する。図12は本実施の形態に係る機械共振器の構造図である。

【0089】

図12において、電極2の両端から ΔL の長さ分121の導電体を絶縁体に置き換えた点が図1の構造と異なる。

【0090】

図13は、 $\Delta L/L$ をパラメータとした場合の振動変位 y と静電容量 C との関係をあらわした特性図である。ただし、 $d=0.1\mu\text{m}$ 、 $\epsilon_r=1$ 、 $\delta_{\text{max}}=1\mu\text{m}$ 、 $L=40\mu\text{m}$ 、 $W=20\mu\text{m}$ とした。

【0091】

電極の両端の絶縁部を多くするほど、すなわち、 $\Delta L/L$ を大きくするほど、静電容量 C を低減することができる。ただし、このとき $|\Delta C/\Delta y|$ も低下し、同図に参照として示した図3に示した従来の平行平板構造の $|\Delta C/\Delta y|$ の値まで次第に近づいてくる。静電容量 C の低減と $|\Delta C/\Delta y|$ の増加はトレードオフの関係にあり、その中で使用条件に合わせて最適な $y-C$ 特性を選択することができる。

【0092】

以上のような、電極の両端を絶縁体に置き換えることで得られた効果を換言すると、従来の平行平板型の構造にした場合よりも、 $|\Delta C/\Delta y|$ を大きくするためには、必ずしも全長 L にわたって表面形状が共振モードでの波形状である電極を配する必要はなく、全長のうちの一部が共振モードでの波形状であっても同様の効果が得られると言える。

【0093】

また、これらにより、本実施の形態に係る機械共振器は、簡単な構造で、振動体の変位が小さいときの静電容量を小さくし、振動体が共振モードで変位が大きいときの静電容量を大きくすることができるので、不要な交流電流が低減され、かつ電気信号を効率よく機械振動に変換したり、機械振動を効率よく電気信号に変換したりすることができる。

【0094】

(実施の形態6)

本実施の形態は、振動体の振動変位 y と静電容量 C の関係の非線形性を改善する方法に関する。すなわち、図4に示した y と C の関係を見ると、図3に示した従来の平行平板構造に比べて、図2や図6の共振モードでの波形状を有する電極を用いることで、機械・電

気変換効率の指標である $|\Delta C/\Delta y|$ は改善されたが、振動体のマイナス側変位、すなわち振動体が電極側に近接したときの非線形性が顕著になる。従って (数5)、(数6) の中で $\Delta C/\Delta y$ を定数と考えることが難しくなり、電圧と力、変位と電流間の関係は非線形の複雑な挙動をとる。

【0095】

図14は本実施の形態に係る機械共振器の構造図である。図14において、電極2の中心部からx方向の両側に ΔL の長さ分の導電体を絶縁体に置き換えた点が図1の構造と異なる。

【0096】

図15は、 $\Delta L/L$ をパラメータとした場合の振動変位yと静電容量Cとの関係をあらわした特性図である。ただし、 $d=0.1\mu\text{m}$ 、 $\epsilon_r=1$ 、 $\delta_{\text{max}}=1\mu\text{m}$ 、 $L=40\mu\text{m}$ 、 $W=20\mu\text{m}$ とした。

【0097】

電極の中心から ΔL の絶縁体の部分141を多くするほど、すなわち、 $\Delta L/L$ を大きくするほど、振動体1が電極2に近づいたときの非線形性を抑制することができる。ただし、このとき $|\Delta C/\Delta y|$ は低下するため、両者のトレードオフで、使用条件に合わせた最適なy-C特性を得ることができる。

【0098】

以上のような、電極中心部を絶縁体に置き換えることで得られた効果を換言すると、従来の平行平板型の構造にした場合よりも、 $|\Delta C/\Delta y|$ を大きくするためには、必ずしも全長Lにわたって表面形状が共振モードでの波形状である電極を配する必要はなく、全長のうちの一部分が共振モードでの波形状であっても同様の効果が得られると言える。

【0099】

また、これらにより、本実施の形態に係る機械共振器は、簡単な構造で、振動体の変位が小さいときの静電容量を小さくし、振動体が共振モードで変位が大きいときの静電容量を大きくすることができるので、不要な交流電流が低減され、かつ電気信号を効率よく機械振動に変換したり、機械振動を効率よく電気信号に変換したりすることができる。さらに、本実施の形態に係る機械共振器は電圧と力、変位と電流間の関係がより線形に近づき、制御しやすくすることができる。

【0100】

(実施の形態7)

本実施の形態は、電極表面形状を共振モードでの波形とすることにより、入力電圧が低電圧でも振動体の大きな振幅が得られることを利用したスイッチ構造に関する。

【0101】

図16は本実施の形態に係るスイッチの構造図である。

【0102】

図16において、電極2の中心部付近の絶縁層3a中に第1接点電極として接点4aを形成し、その表面を絶縁層3a上に露出させている。また、振動体1の下面中央部にも絶縁層3bを介し第2接点電極として接点4bを形成し、振動体1と電極2の間に直流バイアス電圧 V_b と交流電圧 v_i を印加している。これら接点4a、4bを有している点が、実施の形態6に係る機械共振器の構造と異なる。

【0103】

通常のスイッチは、交流電圧 v_i を用いずに直流電圧 V_b のみを印加して振動体1に静電力を加える。 V_b がプルイン電圧を越えるともはや振動体1のバネ復元力よりも静電力が勝って急激に振動体1は電極方向に吸い寄せられ、接点4a、4bが閉じる。しかしプルイン電圧は通常でも数十～数百ボルトの高電圧となるため、高圧発生回路が必要となる。

。

【0104】

これに対し、本実施の形態に係るスイッチでは、振動体1の共振周波数と同じ周波数の交流電圧 v_i で振動体1を励振する。このときの振動体の振動変位量は、同等の静的な静

電力を加えた場合のQ値倍にも及ぶため、振動体1は容易に絶縁層3a近傍まで到達し、その後はバイアス電圧Vbにより振動体1は電極2へ静電吸着される。なお、本実施の形態では、Q値をあげる目的で、ケース内に収納して雰囲気を真空に封止し、空気の粘性による振動体への減衰効果を極力排除した。

【0105】

以上のように、本発明に係る構造にすることにより、電気信号から機械信号への変換効率が向上し、大きな共振振動が得られるので、共振状態の振動体を電極へ接触させ、静電力で保持するスイッチ機構を実現できる。

【0106】

(実施の形態8)

図17は、本発明に係るスイッチの電極2上の絶縁層3の詳細図であり、粒径 $1\mu\text{m}$ のフッ素樹脂粒子5を無電解メッキ膜6とともに単層で電極上に形成させた状態を示している。このように粒径の揃った樹脂粒子を単層で形成することにより、絶縁層厚を一定に保ち、かつフッ素樹脂の潤滑性により振動体がフッ素樹脂粒子5に接触してもstictionと呼ばれる制御不能な吸着力を減少させることができる。

【産業上の利用可能性】

【0107】

以上のように本発明は、機械共振器を用いた機械振動フィルタやスイッチに有用であり、装置の小型化や高性能化に適している。

【図面の簡単な説明】

【0108】

【図1】本発明の一実施の形態による、電極表面形状を両持ち梁の横振動1次共振モード波形とした機械共振器の構造を示す概略図

【図2】本発明の一実施の形態による、電気→機械変換器の構造を示す概略図

【図3】従来の、電極を平行平板形状とした機械共振器の構造を示す概略図

【図4】本発明の一実施の形態による、共振する振動体の振動変位yと静電容量Cの関係($\delta_{\text{max}} = 1\mu\text{m}$)を示す特性図

【図5】本発明の一実施の形態による、共振する振動体の振動変位yと静電容量Cの関係($\delta_{\text{max}} = 0.3\mu\text{m}$)を示す特性図

【図6】本発明の一実施の形態による、機械→電気変換器の構造を示す概略図

【図7】本発明の一実施の形態による、並列に配置された機械共振フィルタの構成を示す概略図

【図8】本発明の一実施の形態による、6点固定型の梁構造の上面図

【図9】本発明の一実施の形態による、図8の梁構造を用いて直列に配置された機械共振フィルタの構成を示す概略図

【図10】本発明の一実施の形態による、簡易な電気→機械→電気変換機能を有する機械共振フィルタの構造を示す概略図

【図11】(a)、(b)本発明の一実施の形態による、電極も共振構造を有する機械共振器の構成を示す概略図

【図12】本発明の一実施の形態による、電極両端を絶縁性とした機械共振器の構造を示す概略図

【図13】本発明の一実施の形態による、図12の構造における振動変位yと静電容量Cの関係を示す特性図

【図14】本発明の一実施の形態による、電極中央部を絶縁性とした機械共振器の構造を示す概略図

【図15】本発明の一実施の形態による、図14の構造における振動変位yと静電容量Cの関係を示す特性図

【図16】本発明の一実施の形態による、スイッチ構造を有する機械共振器の構造を示す概略図

【図17】本発明の一実施の形態による、四フッ化エチレン樹脂粒子を用いた絶縁層

を示す概略図

【図 18】 (a) 乃至 (d) 本発明の一実施の形態における機械共振器の製作工程を示す概略図

【図 19】 本発明の一実施の形態による、電極表面形状を片持ち梁の横振動 1 次共振モード波形とした機械共振器の構造を示す概略図

【図 20】 (a) 片持ち梁の横振動 2 次共振モード波形を示す図 (b) 本発明の一実施の形態による、電極表面形状を片持ち梁の横振動 2 次共振モード波形とした機械共振器の構造を示す概略図 (c) 本発明の一実施の形態による、電極表面形状を片持ち梁の横振動 2 次共振モード波形とした機械共振器の別の構造を示す概略図 (d) 本発明の一実施の形態による、本図 (b) (c) を複合させた機械共振器の構造を示す概略図

【図 21】 (a) 乃至 (d) 本発明の一実施の形態における電極も共振構造を有する機械共振器の製作工程を示す概略図

【図 22】 従来の機械共振器を用いたフィルタを示す概略図

【図 23】 従来例における、機械共振器の寸法と高周波化の関係を示す特性図

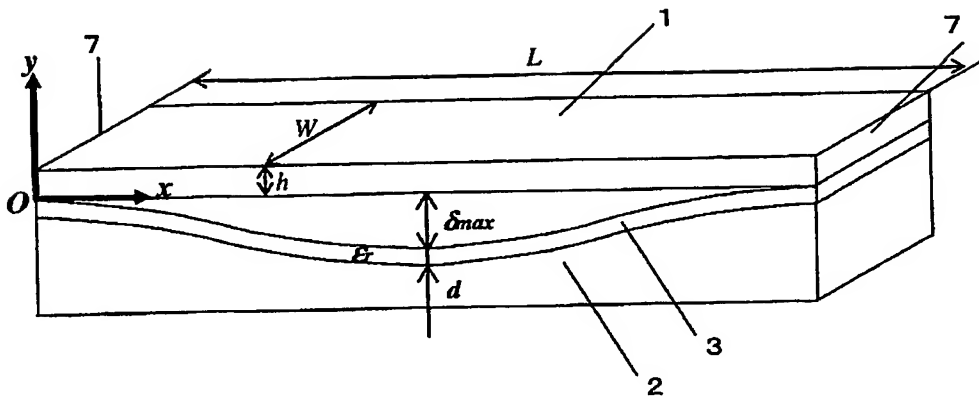
【符号の説明】

【0109】

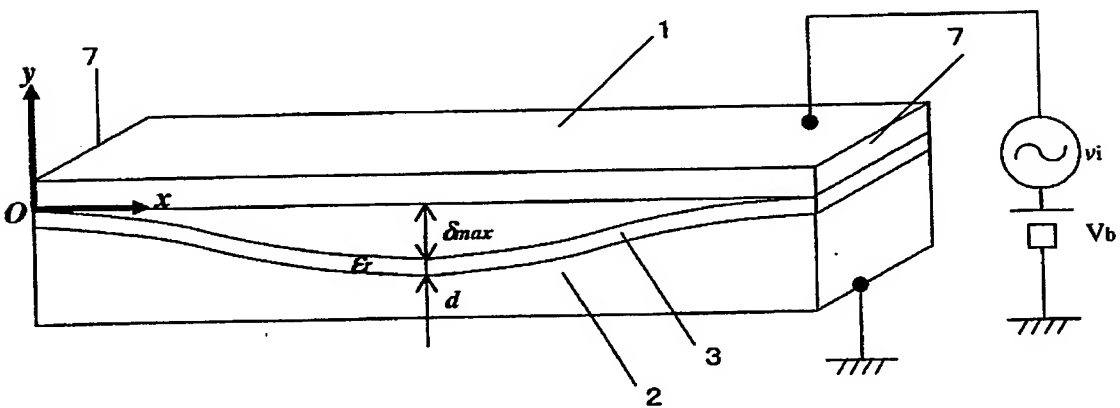
- 1 両持ち梁型振動体
- 2 電極
- 3、3 a、3 b 絶縁層
- 4 a、4 b 接点
- 5 フッ素樹脂粒子
- 6 無電解メッキ膜
- 7 固定端
- 10 基板
- 11 犠牲層
- 12 アルミニウム
- 13、13 a、13 b 振動体
- 14 電極
- 21 片持ち梁型振動体
- 22、22 a、22 b 電極
- 23 絶縁層
- 15 微細穴
- 16 アンカー
- 101、102 両持ち梁型振動体
- 103 結合梁
- 104 入力線路
- 105 出力線路
- 121 電極の両端から ΔL の長さ部分
- 141 電極の中心から ΔL の絶縁体の部分

【書類名】 図面

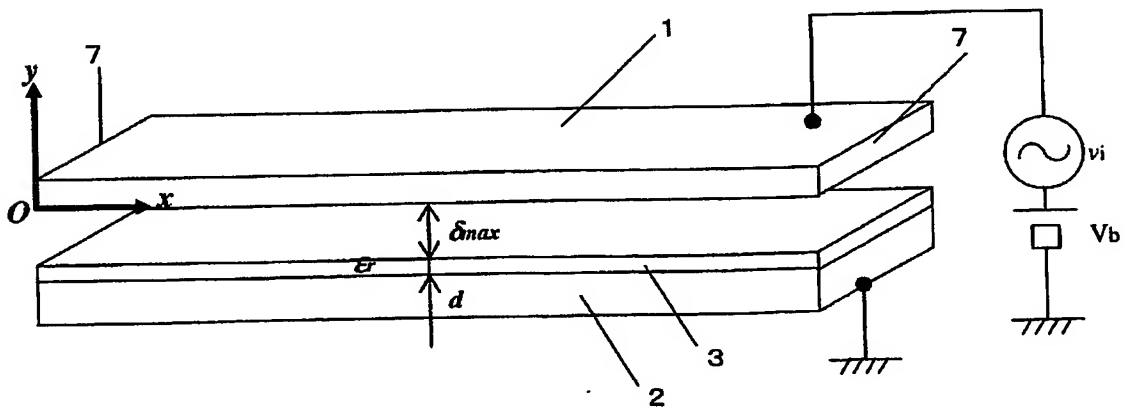
【図 1】



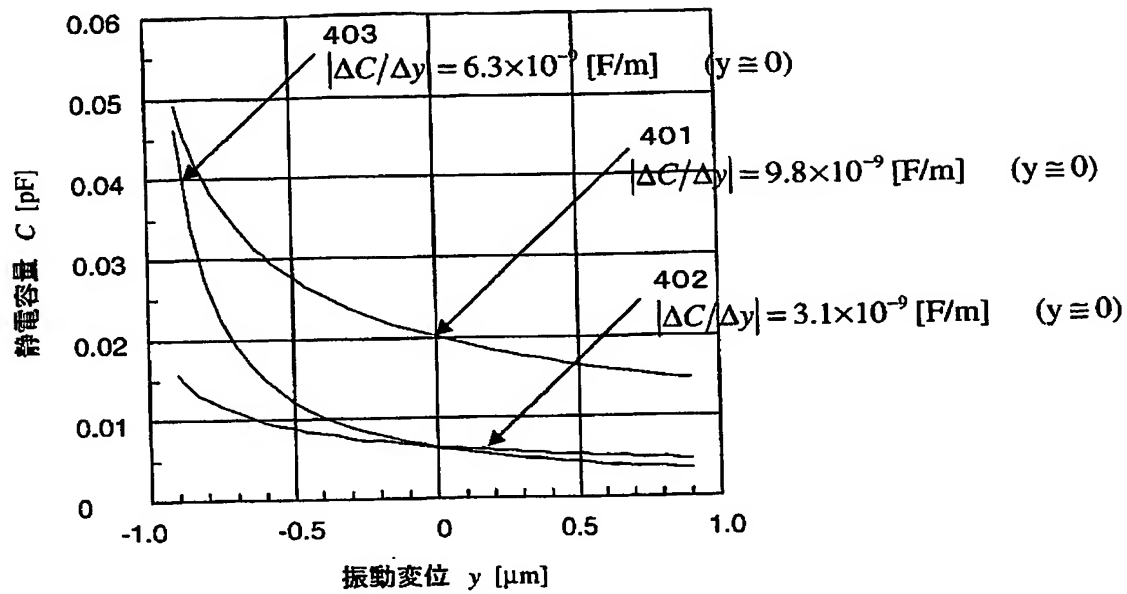
【図 2】



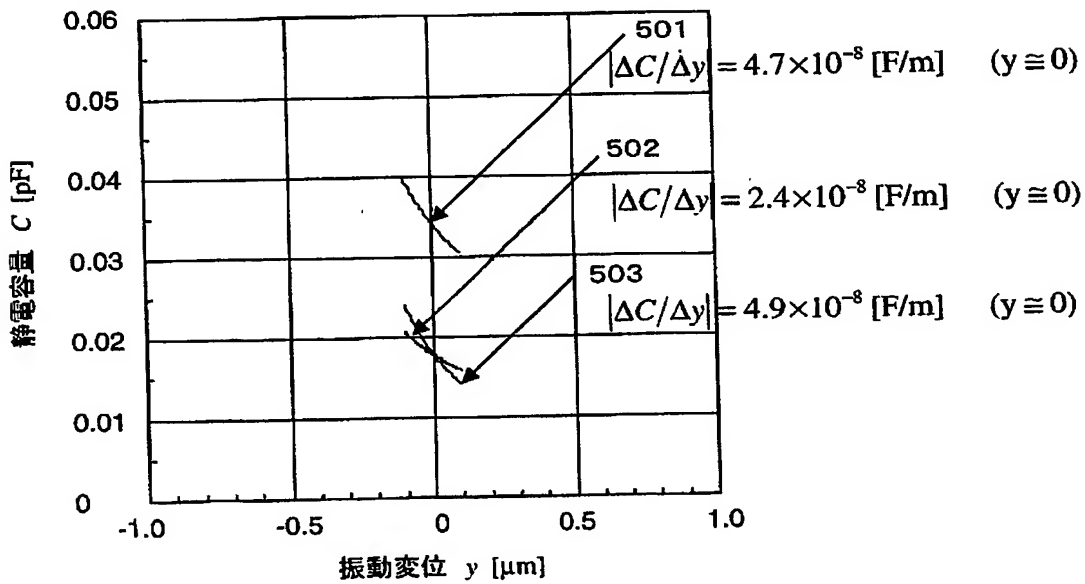
【図 3】



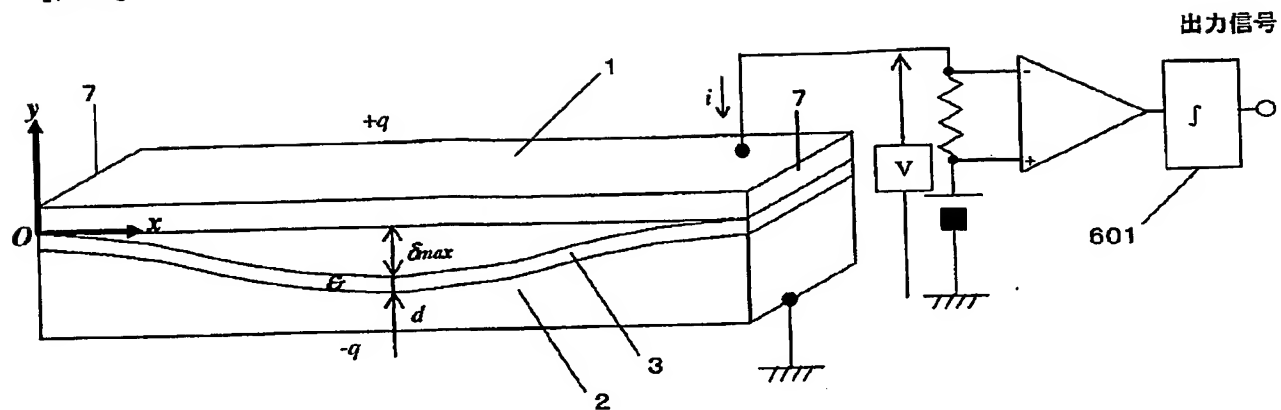
【図 4】



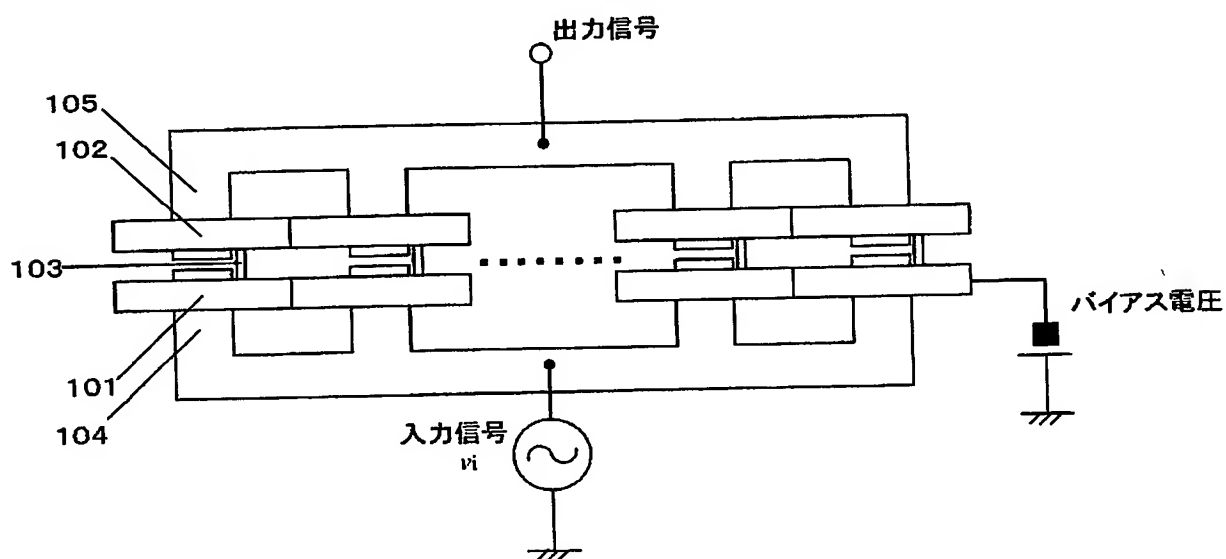
【図 5】



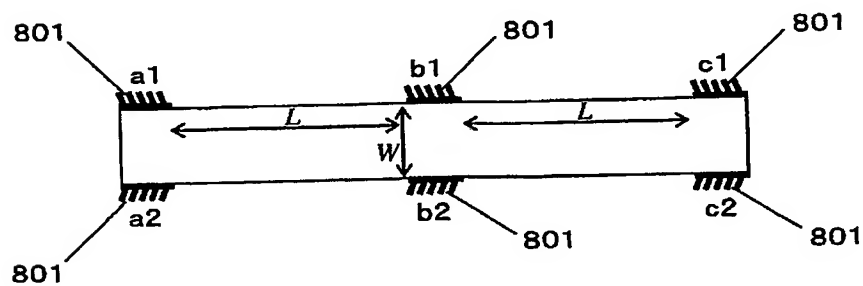
【図 6】



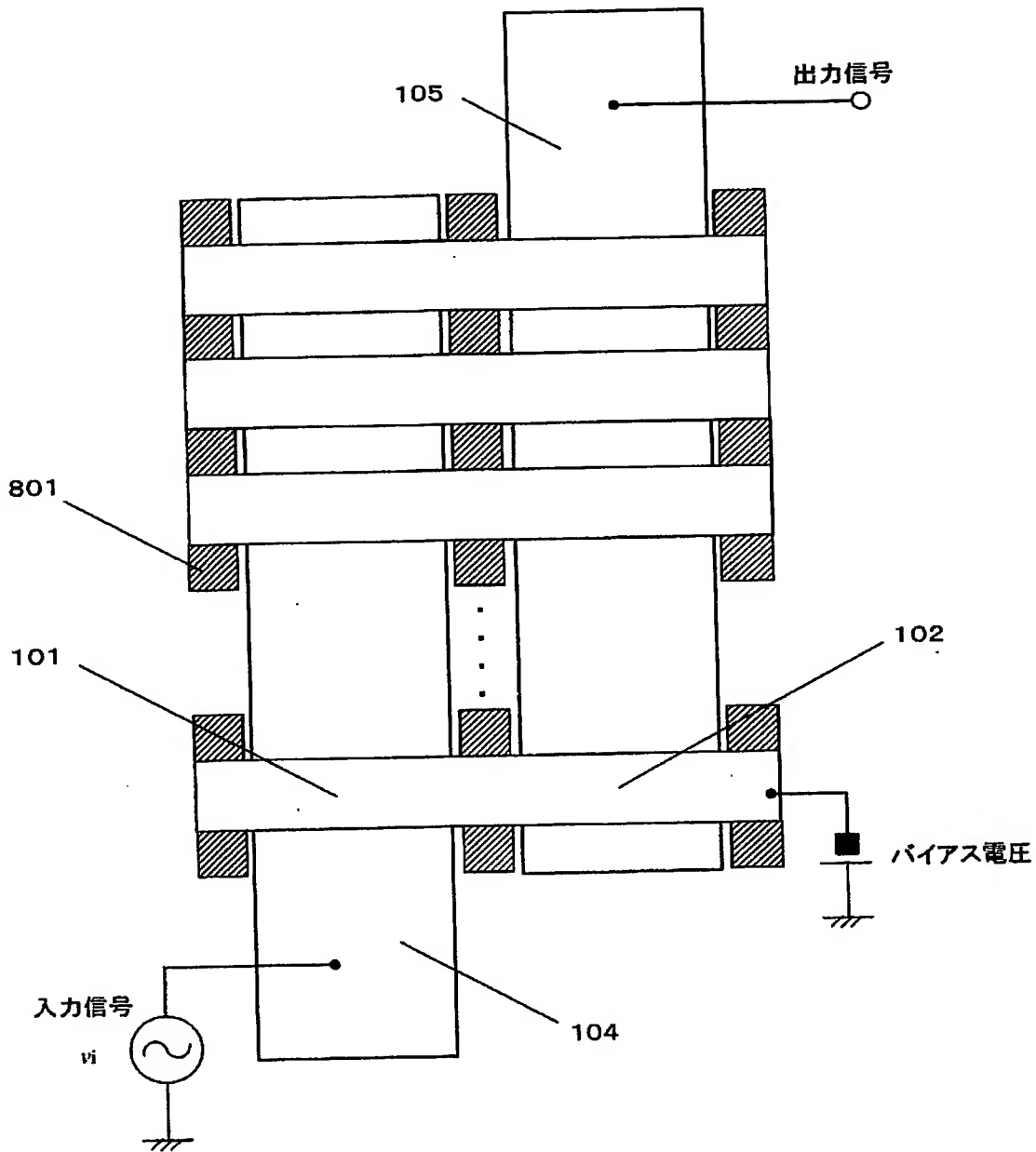
【図 7】



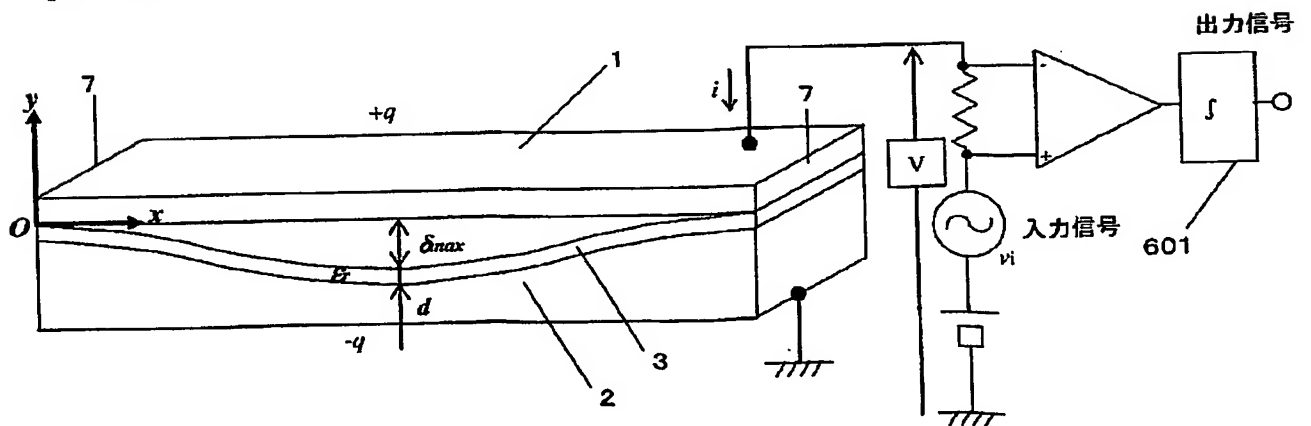
【図 8】



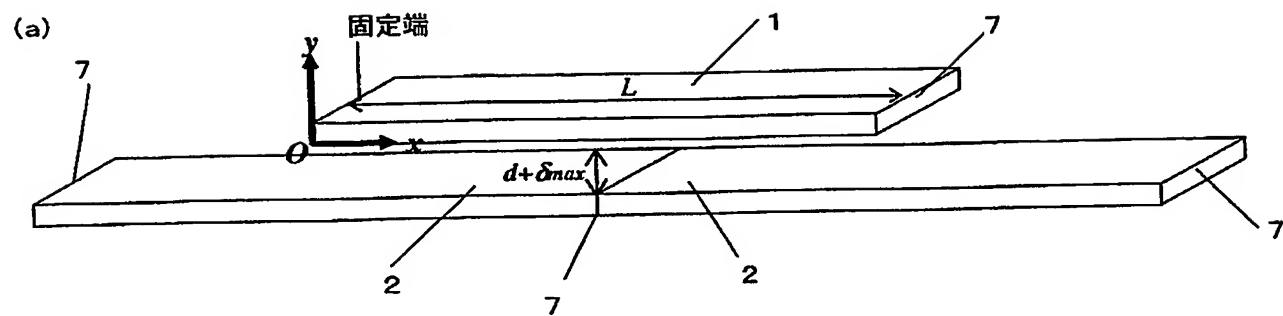
【図 9】



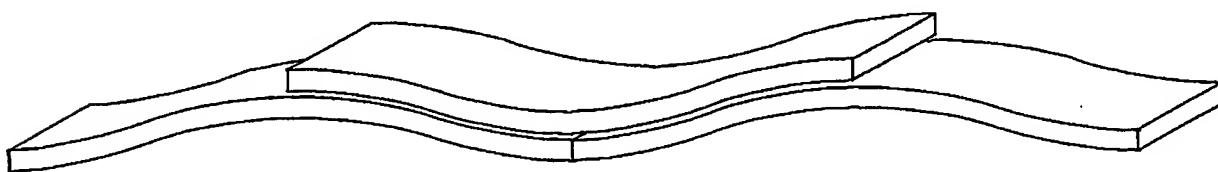
【図 10】



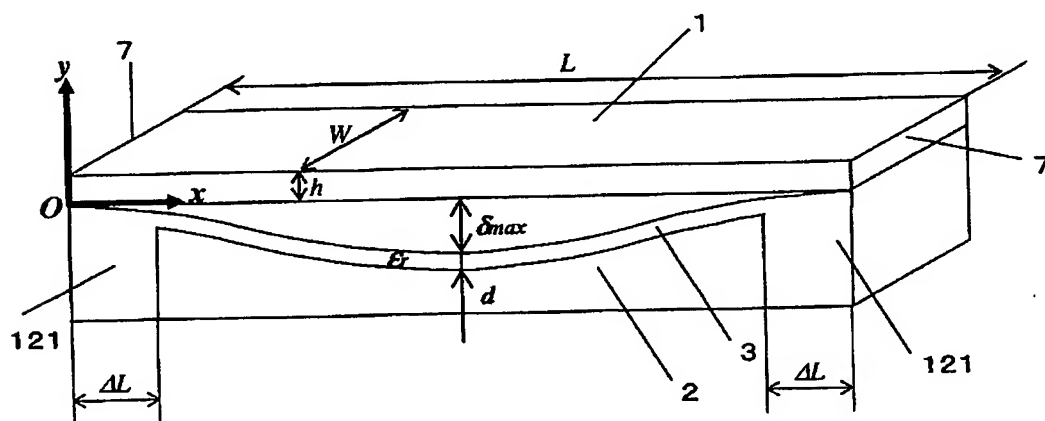
【図 11】



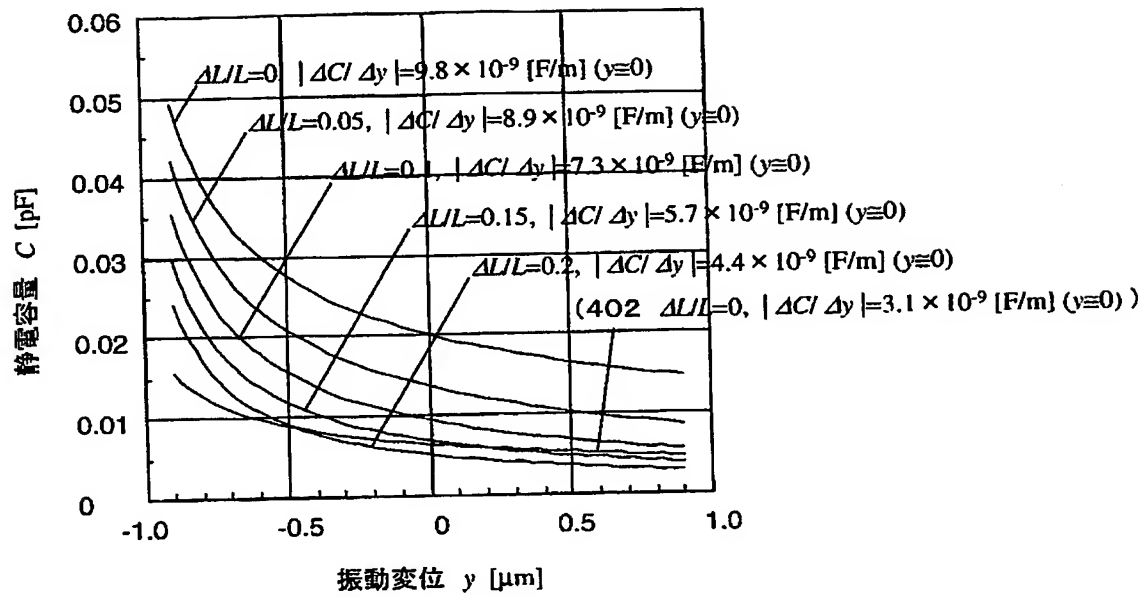
(b)



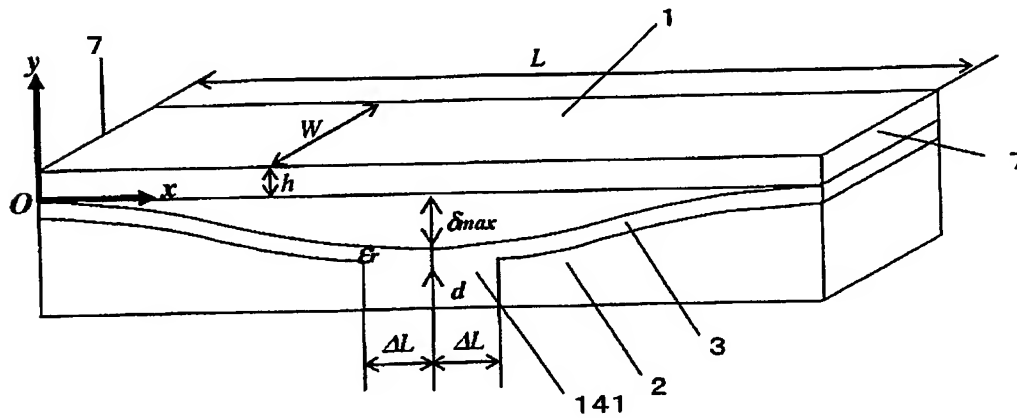
【図 12】



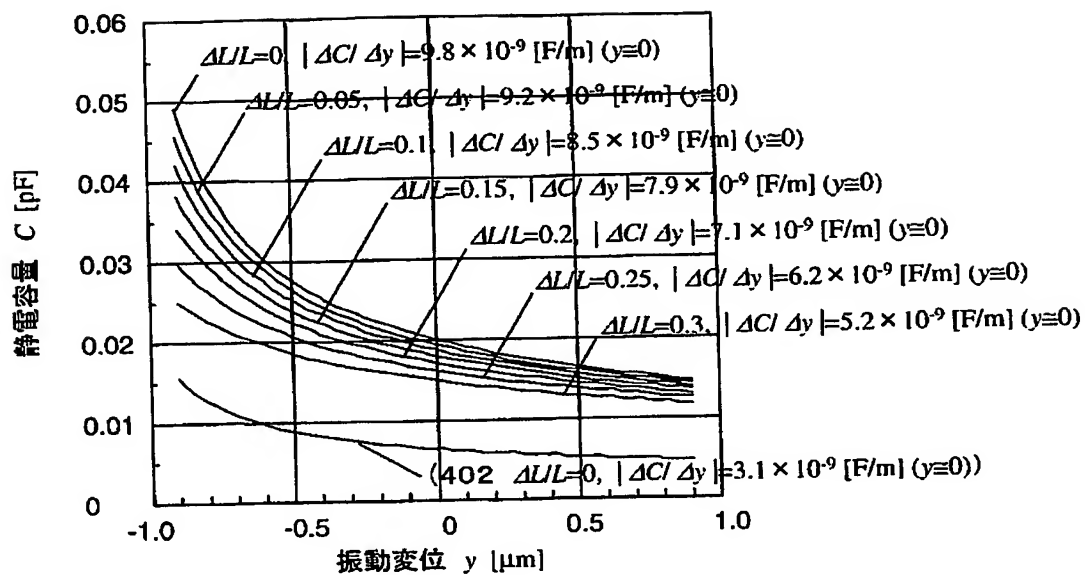
【図 13】



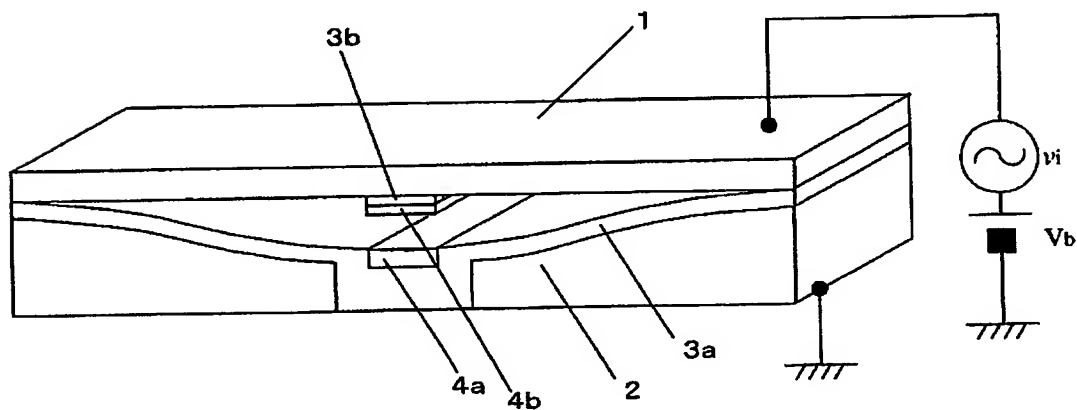
【図 14】



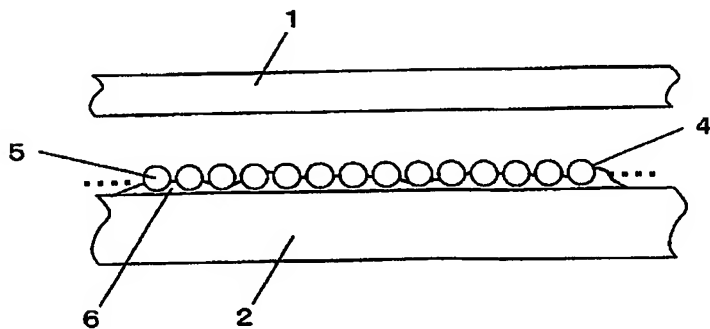
【図 15】



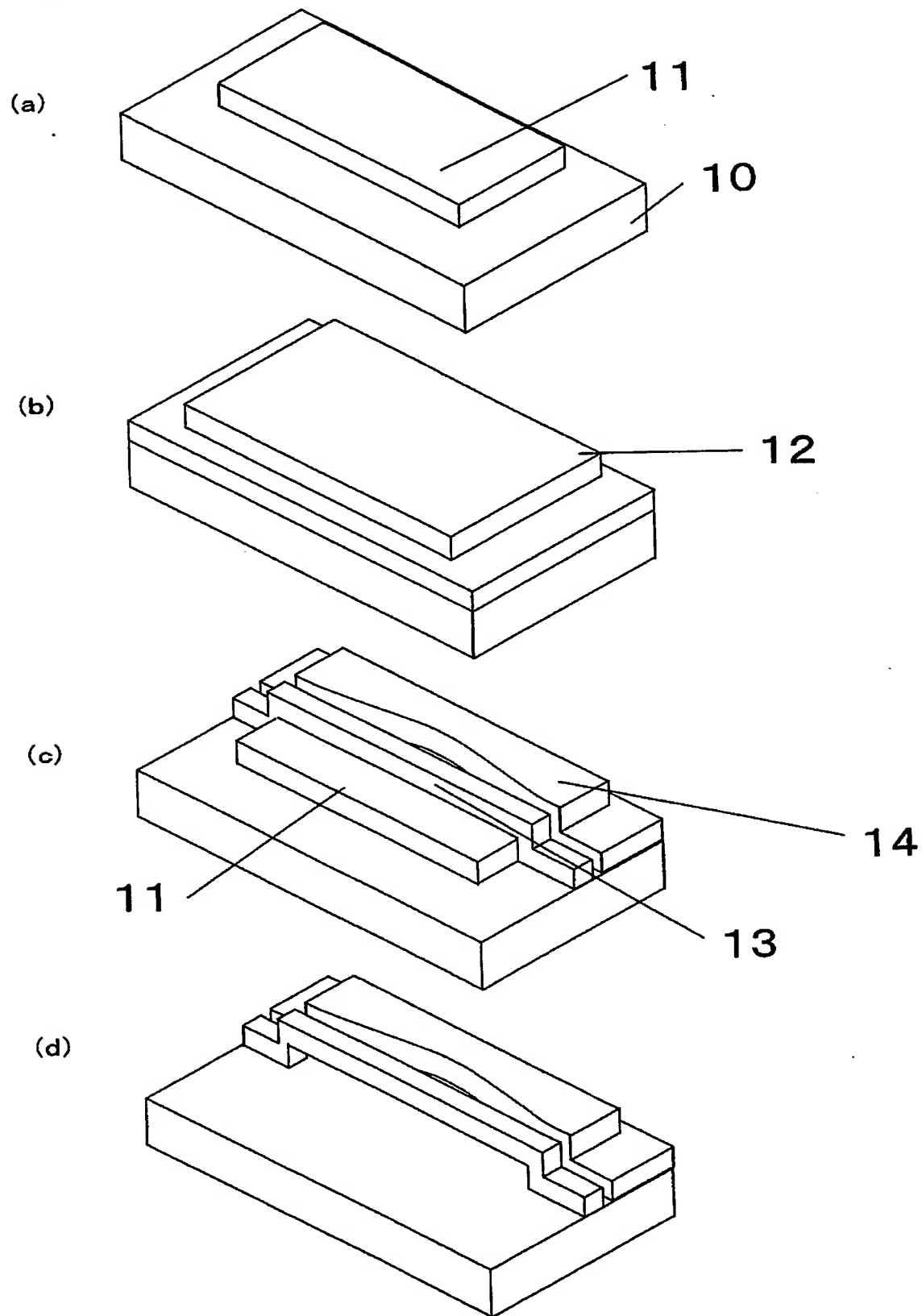
【図 16】



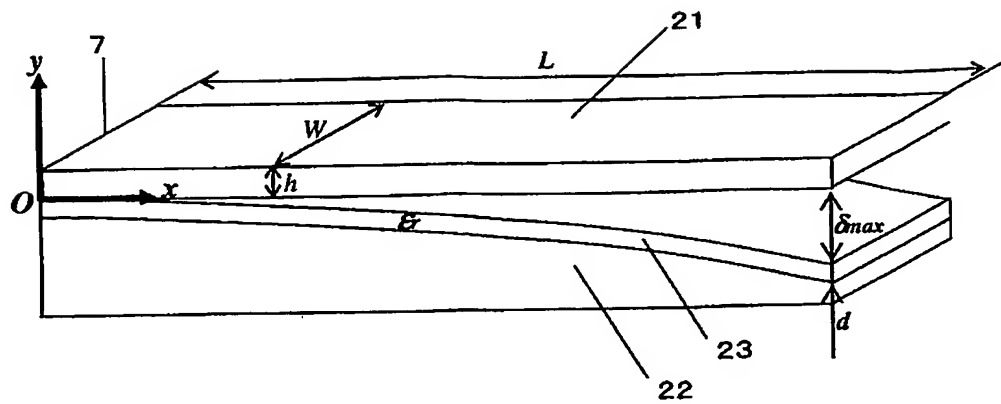
【図 17】



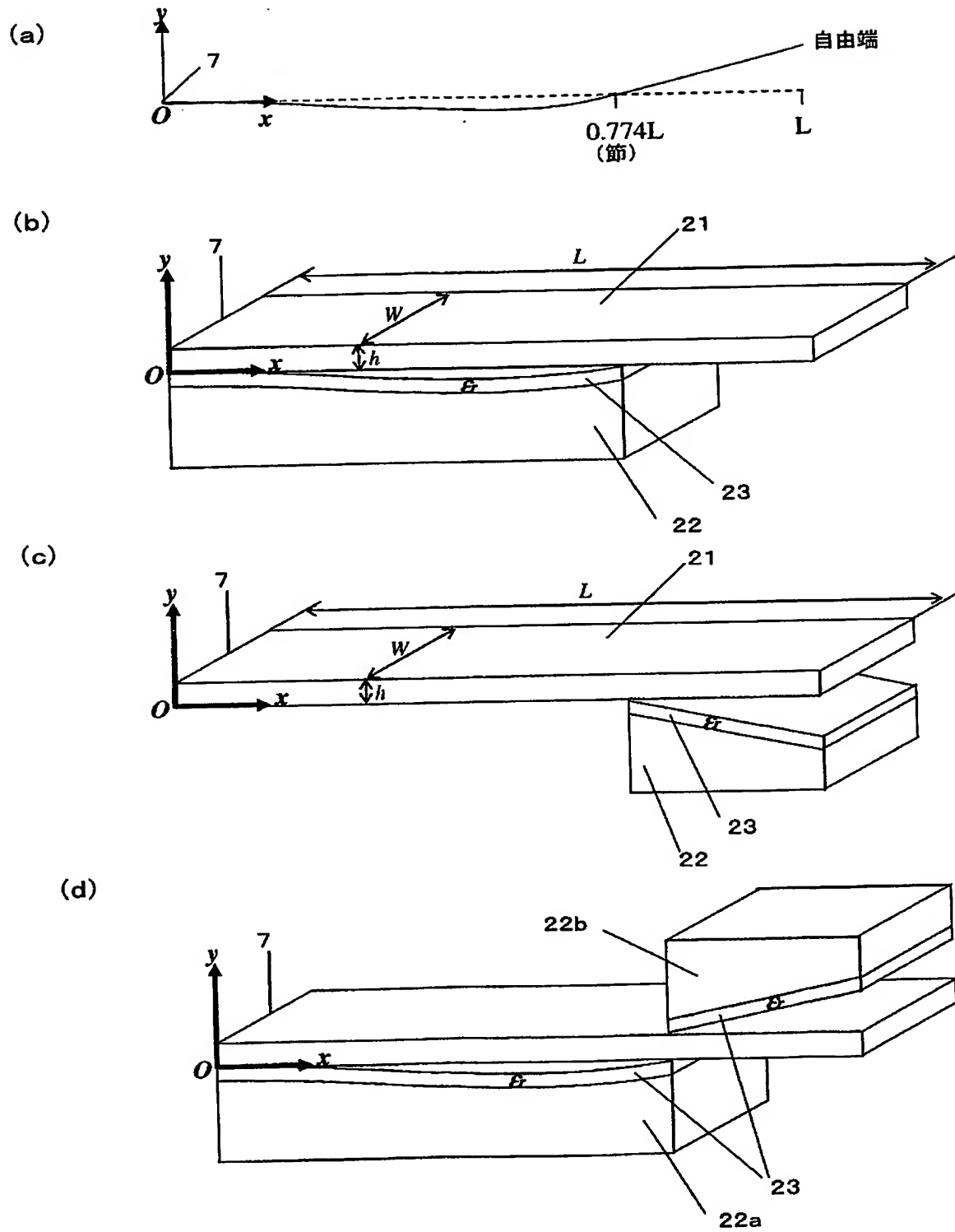
【図 18】



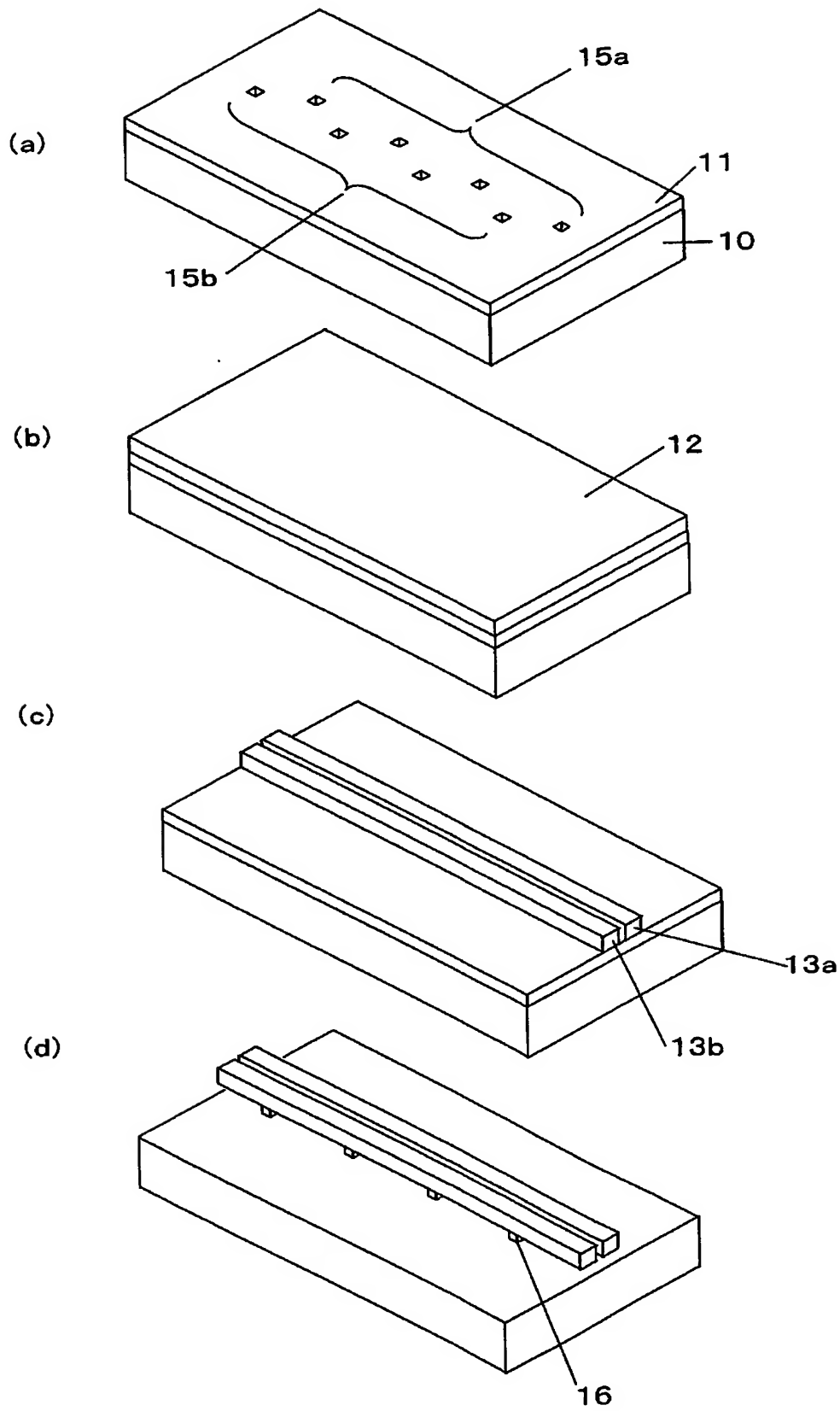
【図 19】



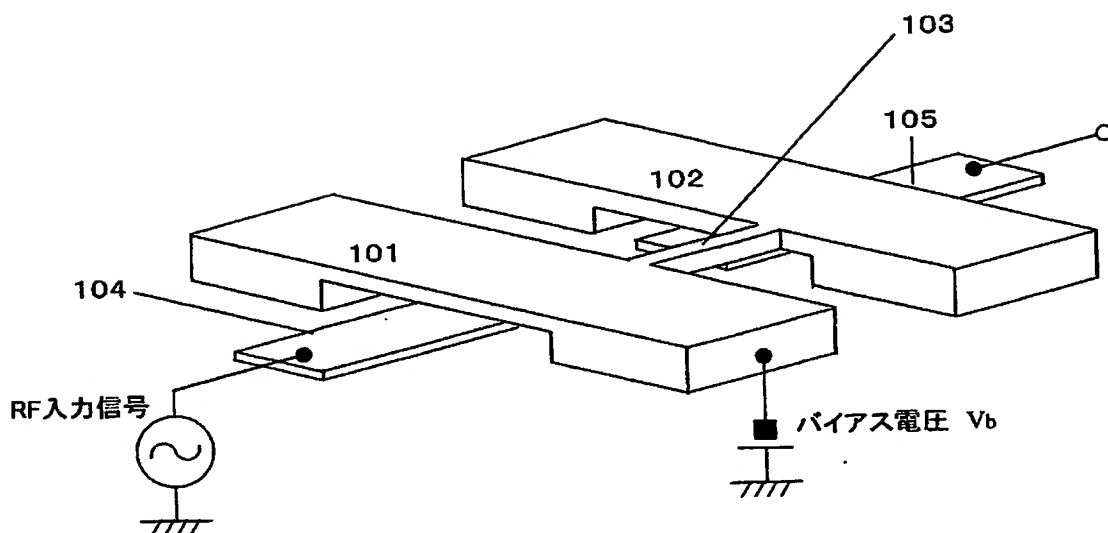
【図 20】



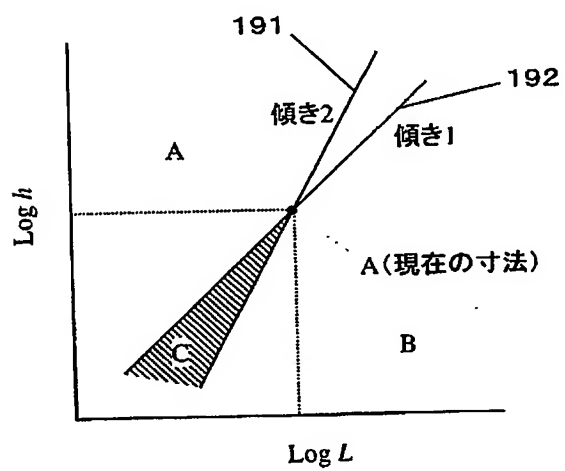
【図 21】



【図 2 2】



【図 2 3】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】本発明は、機械振動式フィルタ等に用いる小型高性能の機械共振器を提供することを目的とする。

【解決手段】機械的共振振動を行う振動体1と、振動体1に近接して位置する電極2とを有し、電極2の表面形状が振動体1の共振モードで変形したときの形状となるように機械共振器を構成することで、単位振動変位量あたりの静電容量変化を大きくし、効率よく電気→機械変換または機械→電気変換を行う機械共振器を実現することができる。

【選択図】図1

特願 2 0 0 4 - 0 7 4 2 8 8

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 5 8 2 1]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 8 日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地

氏 名

松下電器産業株式会社